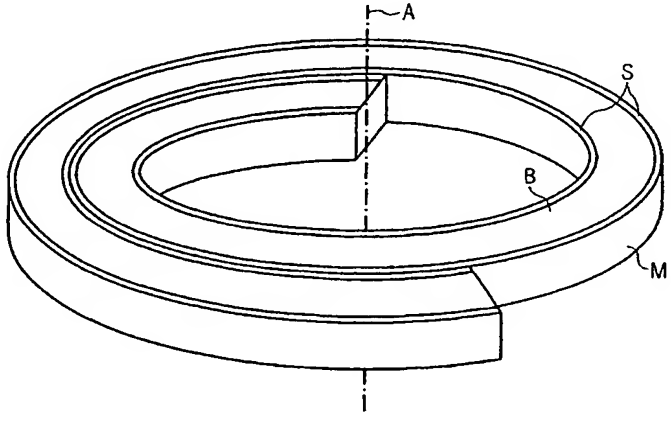


**PCT**WELTORGANISATION FÜR GEISTIGES EIGENTUM  
Internationales BüroINTERNATIONALE ANMELDUNG VERÖFFENTLICHT NACH DEM VERTRAG ÜBER DIE  
INTERNATIONALE ZUSAMMENARBEIT AUF DEM GEBIET DES PATENTWESENS (PCT)

<b>(51) Internationale Patentklassifikation <sup>7</sup> :</b> <b>H01F 38/28, 1/153</b>		<b>A1</b>	<b>(11) Internationale Veröffentlichungsnummer: WO 00/30132</b>
			<b>(43) Internationales Veröffentlichungsdatum:</b> 25. Mai 2000 (25.05.00)
<b>(21) Internationales Aktenzeichen:</b> PCT/DE99/03631		<b>(81) Bestimmungsstaaten:</b> JP, KR, US, europäisches Patent (AT, BE, CH, CY, DE, DK, ES, FI, FR, GB, GR, IE, IT, LU, MC, NL, PT, SE).	
<b>(22) Internationales Anmeldedatum:</b> 15. November 1999 (15.11.99)		<b>Veröffentlicht</b> Mit internationalem Recherchenbericht.	
<b>(30) Prioritätsdaten:</b> 198 52 424.2 13. November 1998 (13.11.98) DE			
<b>(71) Anmelder (für alle Bestimmungsstaaten ausser US):</b> VACUUMSCHMELZE GMBH [DE/DE]; Grüner Weg 37, D-63450 Hanau (DE).			
<b>(72) Erfinder; und</b>			
<b>(75) Erfinder/Anmelder (nur für US):</b> OTTE, Detlef [DE/DE]; Wiesenweg 8, D-63584 Gründau (DE). PETZOLD, Jörg [DE/DE]; Varangevillerstr. 2, D-63486 Bruchköbel (DE).			
<b>(74) Gemeinsamer Vertreter:</b> VACUUMSCHMELZE GMBH; Zedlitz, Peter, Postfach 22 13 17, D-80503 München (DE).			
<b>(54) Title:</b> MAGNETIC CORE THAT IS SUITABLE FOR USE IN A CURRENT TRANSFORMER, METHOD FOR THE PRODUCTION OF A MAGNETIC CORE AND CURRENT TRANSFORMER WITH A MAGNETIC CORE			
<b>(54) Bezeichnung:</b> MAGNETKERN, DER ZUM EINSATZ IN EINEM STROMWANDLER GEEIGNET IST, VERFAHREN ZUR HERSTELLUNG EINES MAGNETKERNS UND STROMWANDLER MIT EINEM MAGNETKERN			
<b>(57) Abstract</b> <p>The magnetic core (M) consists of a coiled ferromagnetic alloy strip whereby at least 50 % of the volume contains fine crystalline particles with an average particle size of 100 nm or less (nanocrystalline alloy). Its permeability is greater than 12 000 and lower than 350 000. The saturation-magnetostriction of the magnetic core (M) is less than 1 ppm. The core (M) is substantially free from mechanical stress. The magnetic core (M) has an anisotropic axis (A) along which the magnetization of the magnetic core (M) can be oriented in a particularly easy manner and which is perpendicular to a plane in which the center line of the strip (B) runs. The composition of the alloy essentially corresponds to the formula <math>\text{Fe}_a\text{Co}_b\text{Cu}_c\text{Si}_d\text{B}_e\text{M}_f</math>, whereby M is at least one of the elements V, Nb, Ta, Ti, Mo, W, Zr and Hf, a, b, c, d, e, f are indicated in atom %, and a, b, c, d, e and f meet the following conditions: <math>0,5 \leq c \leq 2</math>; <math>6,5 \leq d \leq 18</math>; <math>5 \leq e \leq 14</math>; <math>1 \leq f \leq 6</math>; with <math>d + e &gt; 18</math> and <math>0 \leq b \leq 15</math>, whereby <math>a + b + c + d + e + f = 100</math>.</p>			
			

### (57) Zusammenfassung

Der Magnetkern (M) besteht aus einem gewickelten Band aus einer ferromagnetischen Legierung, bei der mindestens 50% des Volumens der Legierung durch feinkristalline Teilchen mit einer mittleren Teilchengrösse von 100 nm oder weniger eingenommen sind (d.h. feinkristalline Legierung). Der Magnetkern (M) weist eine Permeabilität auf, die grösser als 120000 und kleiner als 350000 ist. Eine Sättigungsmagnetostriktion des Magnetkerns (M) weist einen Betrag auf, der kleiner als 1 ppm ist. Der Magnetkern (M) ist im wesentlichen frei von mechanischen Spannungen. Der Magnetkern (M) weist eine Anisotropieachse (A) auf, entlang der sich die Magnetisierung des Magnetkerns (M) besonders leicht ausrichtet und die senkrecht zu einer Ebene ist, in der eine Mittellinie des Bandes (B) verläuft. Die Legierung weist eine Zusammensetzung auf, die im wesentlichen aus der Formel  $\text{Fe}_a\text{Co}_b\text{Cu}_c\text{Si}_d\text{B}_e\text{M}_f$  besteht, worin M zumindest eines der Elemente Ni, Ta, Ti, Mo, W, Zr und Hf ist, wobei a, b, c, d, e und f in Atom-% angegeben sind, und wobei a, b, c, d, e und f die folgenden Bedingungen erfüllen:  $0,5 \leq c \leq 2$ ;  $6,5 \leq d \leq 10$ ;  $0 \leq e \leq 1$ ;  $1 \leq f \leq 6$ ; mit  $d + e \geq 18$  und  $0 \leq b \leq 15$ , wobei  $a + b + c + d + e + f = 100$  sind.

### LEDIGLICH ZUR INFORMATION

Codes zur Identifizierung von PCT-Vertragsstaaten auf den Kopfbögen der Schriften, die internationale Anmeldungen gemäss dem PCT veröffentlichen.

AL	Albanien	ES	Spanien	LS	Lesotho	SI	Slowenien
AM	Armenien	FI	Finnland	LT	Litauen	SK	Slowakei
AT	Österreich	FR	Frankreich	LU	Luxemburg	SN	Senegal
AU	Australien	GA	Gabun	LV	Lettland	SZ	Swasiland
AZ	Aserbaidschan	GB	Vereinigtes Königreich	MC	Monaco	TD	Tschad
BA	Bosnien-Herzegowina	GE	Georgien	MD	Republik Moldau	TG	Togo
BB	Barbados	GH	Ghana	MG	Madagaskar	TJ	Tadschikistan
BE	Belgien	GN	Guinea	MK	Die ehemalige jugoslawische Republik Mazedonien	TM	Turkmenistan
BF	Burkina Faso	GR	Griechenland			TR	Türkei
BG	Bulgarien	HU	Ungarn	ML	Malien	TT	Trinidad und Tobago
BJ	Benin	IE	Irland	MN	Montenegro	UA	Ukraine
BP	Burundi	IL	Israel	MR	Mauretanien	UG	Uganda
BY	Belarus	IS	Island	MW	Malawi	US	Vereinigte Staaten von Amerika
CA	Canada	IT	Italien	MX	Mexiko	UZ	Usbekistan
CI	Cote d'Ivoire	JP	Japan	NE	Niger	VN	Vietnam
CG	Congo	KE	Kenia	NL	Niederlande	YU	Jugoslawien
CH	Schweiz	KG	Kirgisistan	NO	Norwegen	ZW	Zimbabwe
CM	Kamerun	KP	Demokratische Volksrepublik Korea	NZ	Neuseeland		
CN	China	KR	Republik Korea	PL	Polen		
CU	Kuba	KZ	Kasachstan	PT	Portugal		
CY	Zypern	LC	St. Lucia	RO	Rumänien		
DE	Deutschland	LI	Liechtenstein	RU	Russische Föderation		
DK	Dänemark	LK	Sri Lanka	SD	Sudan		
EE	Estland	LR	Liberia	SE	Schweden		
				SG	Singapur		

## Beschreibung

Magnetkern, der zum Einsatz in einem Stromwandler geeignet ist, Verfahren zur Herstellung eines Magnetkerns und  
5 Stromwandler mit einem Magnetkern.

Die Erfindung betrifft einen Magnetkern, der zum Einsatz in einem Stromwandler geeignet ist, ein Verfahren zur Herstellung eines solchen Magnetkerns und einen Stromwandler  
10 mit einem solchen Magnetkern.

Zur Erfassung des Energieverbrauchs elektrischer Geräte und Anlagen in Industrie und Haushalt werden Energiezähler eingesetzt. Das älteste dabei gebräuchliche Prinzip ist das  
15 des Ferraris-Zählers. Der Ferraris-Zähler basiert auf der Energiezählung über die Rotation einer mit einem mechanischen Zählwerk verbundenen Scheibe, die durch die strom- bzw. spannungsproportionalen Felder entsprechender Feldspulen angetrieben wird. Für die Erweiterung der  
20 Funktionsmöglichkeiten von Energiezählern wie z.B. für Mehrtarifbetrieb oder Fernablesung werden elektronische Energiezähler eingesetzt, bei denen die Strom- und Spannungserfassung über induktive Strom- und Spannungswandler erfolgt.

25 Eine spezielle Anwendung, bei der eine besonders hohe Genauigkeit gefordert ist, ist die Erfassung der Energieströme im Bereich der Elektrizitätsversorgungsunternehmen. Hier müssen zum einen  
30 die von den jeweiligen Kraftwerken erzeugten und in die Hochspannungsnetze eingespeisten Energiemengen präzise bestimmt werden, zum anderen sind für die Abrechnung die wechselnden Anteile von Verbrauch oder Lieferung im Verkehr zwischen den Energieversorgungsunternehmen von großer  
35 Bedeutung. Die hierfür eingesetzten Energiezähler sind Multifunktions-Einbaugeräte, deren Eingangssignale für Strom und Spannung aus dem jeweiligen Hoch- und

Mittelspannungsanlagen über Kaskaden von Strom- und Spannungswandlern abgegriffen werden und deren Ausgangssignale zur digitalen und graphischen Registrierung bzw. Anzeige sowie zu Steuerungszwecken in den Schaltwarten dienen. Dabei dienen die netzseitig ersten Wandler zur potentialgetrennten Transformation der hohen Strom- und Spannungswerte, z.B. 1 bis 100 kA und 10 bis 500 kV, auf in Schaltschränken handhabbare Werte, die zweiten transformieren diese im eigentlichen Energiezähler auf die von der Meßelektronik benötigten Signalpegel im Bereich weniger 10 bis 100 mV.

Die Figur 1 zeigt ein Ersatzschaltbild eines solchen Stromwandlers und die Bereiche der technischen Daten, wie sie in verschiedenen Anwendungen auftreten können. Gezeigt ist hier ein Stromwandler 1. Auf einem Magnetkern 4, der aus einem nanokristallinen weichmagnetischen Band aufgebaut ist, befindet sich die Primärwicklung 2, die den zu messenden Strom  $I_{\text{prim}}$  führt und eine Sekundärwicklung 3, die den Meßstrom  $I_{\text{sec}}$  führt. Der Sekundärstrom  $I_{\text{sec}}$  stellt sich automatisch so ein, daß die Amperewindungen primär und sekundär im Idealfall gleich groß und entgegengesetzt gerichtet sind. Der Verlauf der Magnetfelder in einem solchen Stromwandler ist in der Figur 2 dargestellt, wobei Verluste im Magnetkern nicht berücksichtigt sind. Der Strom in der Sekundärwicklung 3 stellt sich dann nach dem Induktionsgesetz so ein, daß er die Ursache seiner Entstehung, nämlich die zeitliche Änderung des magnetischen Flusses im Magnetkern 4, zu hindern versucht.

Im idealen Stromwandler ist daher der Sekundärstrom, multipliziert mit dem Verhältnis der Windungszahlen, negativ gleich dem Primärstrom, was durch Gleichung (1) veranschaulicht wird:

$$I_{\text{sec}}^{\text{ideal}} = -I_{\text{prim}} * (N_{\text{prim}} / N_{\text{sec}}) \quad (1)$$

Dieser Idealfall wird wegen der Verluste im Bürdenwiderstand 5, im Kupferwiderstand 6 der Sekundärwicklung und im Magnetkern 4 nie erreicht.

- 5 Im realen Stromwandler weist daher der Sekundärstrom gegenüber der obigen Idealisierung einen Amplitudenfehler und einen Phasenfehler auf, was durch Gleichung (2) beschrieben wird:

$$10 \quad \text{Amplitudenfehler: } F(I) = \frac{I_{\text{sec}}^{\text{real}} - I_{\text{sec}}^{\text{ideal}}}{I_{\text{sec}}^{\text{ideal}}}; \text{ Phasenfehler: } \varphi(I) = \phi(I_{\text{sec}}^{\text{real}}) - \phi(-I_{\text{prim}}) \quad (2)$$

Die Ausgangssignale eines solchen Stromwandlers werden digitalisiert, multipliziert, integriert und gespeichert. Das Ergebnis ist eine elektrische Größe, die für die genannten  
15 Zwecke zur Verfügung steht.

Die zur Energiezählung in diesen Anwendungen eingesetzten elektronischen Energiezähler arbeiten "indirekt", so daß nur rein bipolare, nullsymmetrische Wechselströme im Zähler  
20 selbst gemessen werden müssen. Dazu dienen Stromwandler, die mit Magnetkernen aus hochpermeablen Werkstoffen aufgebaut sind und zur Erreichung geringer Meßfehler über einen kleinen Phasenfehler  $\varphi$  mit sehr vielen, d.h. typischerweise 2500 und mehr, Sekundärwindungen ausgestattet sein müssen.

25 Für die Abbildung rein bipolarer Ströme sind Stromwandler bekannt, deren Magnetkerne aus hochpermeablen kristallinen Legierungen, insbesondere Nickel-Eisen-Legierungen, bestehen, die ca. 80 Gew.% Nickel enthalten und unter dem Namen  
30 "Permalloy" bekannt sind. Diese weisen einen grundsätzlich sehr niedrigen Phasenfehler  $\varphi$  auf. Sie haben dabei aber den Nachteil, daß dieser Phasenfehler  $\varphi$  stark mit dem zu messenden Strom  $I_{\text{prim}}$ , was gleichbedeutend mit der Aussteuerung des Wandlerkerns ist, variiert. Für eine präzise  
35 Strommessung bei wechselnden Lasten mit diesen Wandlern ist

daher eine aufwendige Linearisierung im Energiezähler erforderlich.

- Des weiteren sind Stromwandler bekannt, die auf der Basis
- 5 eisenloser Luftspulen arbeiten. Dieses Prinzip ist als sogenanntes Rogowski-Prinzip bekannt. Hierbei entfällt der Einfluß der Aussteuerung auf den Phasenfehler. Da die Anforderungen an die Störsicherheit solcher Stromwandler jedoch sehr hoch sein müssen, um eine eichfähige
- 10 Energiezählung zu ermöglichen, sind diese Konstruktionen mit aufwendigen Abschirmungen gegen äußere Felder ausgestattet, was einen hohen Material- und Montageaufwand bedeutet und daher kostenintensiv ist.
- 15 Ferner sind Lösungen bekannt, bei denen ein mit einem Luftspalt versehener (gescherter) Ferrit-Schalenkern als Magnetkern eingesetzt wird. Diese Stromwandler verfügen über eine sehr gute Linearität, jedoch ist aufgrund der relativ niedrigen Permeabilität der Ferrite eine sehr hohe
- 20 Windungszahl in Verbindung mit einem sehr großvolumigen Magnetkern erforderlich, um bei dem Stromwandler einen geringen Phasenwinkel zu erzielen. Diese auf Ferrit-Schalenkernen basierenden Stromwandler weisen ferner ebenfalls eine hohe Empfindlichkeit gegenüber externen
- 25 Fremdfeldern auf, so daß auch dort Abschirmmaßnahmen getroffen werden müssen. Außerdem sind bei Ferriten in der Regel die Magnetwerte stark temperaturabhängig.

- Der Erfindung liegt die Aufgabe zugrunde, einen Magnetkern
- 30 anzugeben, der bei Einsatz in einem Stromwandler im Vergleich zum Stand der Technik eine höhere Meßgenauigkeit eines zu messenden Stroms bei gleichzeitig wirtschaftlicher Ausführung und kompakter Baugröße gestattet. Ferner soll ein Verfahren zur Herstellung eines solchen Magnetkerns sowie ein
- 35 Stromwandler mit einem solchen Magnetkern angegeben werden. Darüberhinaus soll die Temperaturabhängigkeit der Eigenschaften möglichst gering sein.

Die Aufgabe wird gelöst durch einen Magnetkern, der zum Einsatz in einem Stromwandler geeignet ist, dadurch gekennzeichnet, daß er aus einem gewickelten Band aus einer  
5 ferromagnetischen Legierung besteht, bei der mindestens 50% der Legierung von feinen kristallinen Teilchen mit einer mittleren Teilchengröße von 100 nm oder weniger eingenommen wird (nanokristalline Legierung), er eine Sättigungspermeabilität aufweist, die größer als 12000,  
10 besser 20000, und kleiner als 300000, besser 350000, ist, er eine Sättigungsmagnetostriktion aufweist, deren Betrag kleiner als 1 ppm ist, er im wesentlichen frei von mechanischen Spannung ist, und er eine magnetische Anisotropieachse aufweist, entlang der sich die  
15 Magnetisierung des Magnetkerns besonders leicht ausrichtet und die senkrecht zu einer Ebene ist, in der eine Mittellinie des Bandes verläuft. Die Legierung weist eine Zusammensetzung auf, die im wesentlichen aus der Formel

20 
$$\text{Fe}_a\text{Co}_b\text{Cu}_c\text{Si}_d\text{Be}_e\text{M}_f$$

besteht, worin M zumindest eines der Elemente V, Nb, Ta, Ti, Mo, W, Zr und Hf ist, a, b, c, d, e, f in Atom-% angegeben sind, und wobei a, b, c, d, e und f die folgenden Bedingungen  
25 erfüllen:

$0,5 \leq c \leq 2$ ;  $6,5 \leq d \leq 18$ ;  $5 \leq e \leq 14$ ;  $1 \leq f \leq 6$ ;  
mit  $d + e > 18$  und  $0 \leq b \leq 15$ , wobei  $a + b + c + d + e + f = 100$  sind.

30

Die Permeabilität bezieht sich auf eine in der Ebene der Mittellinie des Bandes angelegte Feldstärke und die hierdurch hervorgerufene Induktion.

35 Es hat sich gezeigt, daß bei einem solchen Magnetkern die Abhängigkeit der Permeabilität von der Magnetisierung sehr klein ist. Die Hystereseschleife des Magnetkerns ist also

sehr schmal und linear. Dies setzt ein möglichst kleines Verhältnis von Remanenzinduktion zu Sättigungsinduktion von möglichst weniger als 5 % und kleine Koerzitivfeldstärken von möglichst weniger als 10 mA/cm, besser 5 mA/cm voraus.

5

Da die Permeabilität mit über 12.000 sehr groß ist und zudem im wesentlichen unabhängig von der Magnetisierung ist, sind der absolute Phasenfehler und der absolute Amplitudenfehler eines Stromwandlers mit einem solchen Magnetkern sehr klein.

- 10 Der absolute Amplitudenfehler kann kleiner als  $1\text{‰}$  sein.  
Der absolute Phasenfehler kann kleiner als  $0,1^\circ$  sein.

Der Stromwandler weist neben dem Magnetkern mindestens eine Primärwicklung und eine Sekundärwicklung, zu der ein  
15 Bürdenwiderstand parallel geschaltet ist und der den Sekundärstromkreis niederohmig abschließt, auf.

Es hat sich ferner gezeigt, daß die Hystereseschleife des Magnetkerns eine hohe Linearität aufweist. So betragen ein  
20 Permeabilitätsverhältnis  $\mu_{15}/\mu_4 < 1,1$  und ein Permeabilitätsverhältnis  $\mu_{10}/\mu_{0,5} < 1,1$ , wobei  $\mu_{0,5}$ ,  $\mu_4$ ,  $\mu_{10}$  und  $\mu_{15}$  die Permeabilitäten bei einer Feldamplitude H von 0.5, 4, 10 und 15 mA/cm sind.

- 25 Aufgrund der guten Linearität weisen der Phasen- sowie der Amplitudenfehler im wesentlichen keine Abhängigkeit vom zu messenden Strom auf. Aufgrund der hohen Sättigungsinduktion von beispielsweise 1,2 Tesla gilt dies im Gegensatz zu anderen weichmagnetischen hochpermeablen Werkstoffen für  
30 einen weiteren Feldstärken- bzw. Induktionsbereich.

- Da der absolute Phasenfehler, der absolute Amplitudenfehler und die Abhängigkeit der Fehler vom zu messenden Strom sehr klein sind, kann durch den Stromwandler eine sehr exakte  
35 Stromerfassung erfolgen.



Aufgrund der nanokristallinen Struktur weist der Magnetkern eine überraschend hohe Alterungsbeständigkeit auf, die eine obere Anwendungsgrenztemperatur für den Magnetkern von über 120°C, in Einzelfällen sogar um 150°C erlaubt. Gerade dadurch  
5 eignet sich der Stromwandler mit dem Magnetkern für einen Einsatz weit oberhalb der Raumtemperatur.

Die Eigenschaften des Magnetkerns sind nur schwach temperaturabhängig, wobei diese Abhängigkeit wiederum  
10 weitgehend linear verläuft.

Der Erfindung liegt die Erkenntnis zugrunde, daß mit der Legierung der beschriebenen Zusammensetzung durch eine geeignete Wärmebehandlung ein Magnetkern mit den  
15 beschriebenen Eigenschaften erzeugt werden kann. Dabei sind sehr viele Parameter aufeinander abgestimmt, damit der Magnetkern die beschriebenen Eigenschaften aufweist.

Durch die bei der Wärmebehandlung erzeugte nanokristalline  
20 Zweiphasenstruktur werden bei gleichzeitig hoher Sättigungsinduktion und hoher thermischer Stabilität die beiden grundlegenden Voraussetzungen für gute weichmagnetische Eigenschaften erfüllt:

- 25 1) Eliminierung, d.h. Ausmittelung der Kristallanisotropie  $K_1$  durch die glättende Wirkung der kornübergreifenden ferromagnetischen Austauschwechselwirkung.
- 2) Weitestgehende Einstellung des Nulldurchgangs der Sättigungsmagnetostriktion  $\lambda_S$  ( $\lambda_S < 1\text{ppm}$ ) durch  
30 Überlagerung der beiden Magnetostriktionsbeiträge von nanokristallinem Korn und amorpher intergranularer Restphase.

Da hierdurch die im Band bzw. Magnetkern verbleibenden  
35 Störanisotropien bis auf ca. 2 J/m<sup>3</sup> oder noch weniger eliminiert werden, können bereits bei sehr kleinen uniaxialen magnetfeldinduzierten Queranisotropien hochlineare

Hystereseschleifen (F-Schleifen) mit höchsten Permeabilitäten erzeugt werden.

Im folgenden wird eine Wärmebehandlung, die ein Verfahren zur  
5 Herstellung eines Magnetkerns ist und ebenfalls die Aufgabe  
löst, beschrieben:

Nach Herstellung und Wicklung des Bandes zum Magnetkern wird  
der Magnetkern auf eine Zieltemperatur zwischen 450°C und  
10 600° C erhitzt. Vorzugsweise liegt die Zieltemperatur  
oberhalb 520°C. Dabei wird ausgehend von einem amorphen  
Zustand des Bandes die nanokristalline Zweiphasenstruktur  
ausgebildet.

15 Nachdem die nanokristalline Zweiphasenstruktur ausgebildet  
wurde, wird zur Bildung der Anisotropieachse bei einer  
Temperatur unterhalb der Curie-Temperatur der Legierung ein  
Magnetfeld von mindestens 100 A/cm eingeschaltet, das  
transversal zur Richtung des gewickelten Bandes steht  
20 (Querfeld). Dieses Querfeld muß so groß sein, daß sich der  
Kern in Richtung der auszubildenden Anisotropieachse im  
Zustand seiner Sättigungsinduktion befindet. Die Curie-  
Temperatur ist die Temperatur, bei der eine spontane  
Magnetisierung der Legierung einsetzt.

25 Die Zieltemperatur ist so gewählt, daß sie oberhalb der  
Kristallisationstemperatur der Legierung liegt. Sie wird  
derart an die Legierungszusammensetzung angepaßt, daß  
aufgrund der sich einstellenden Korngrößenverteilung und  
30 Volumenerfüllung des Kornes eine möglichst gute Ausmittelung  
der Kristallanisotropie  $K_1$  entsteht. Gleichzeitig sollen sich  
die Magnetostruktionsbeiträge von nanokristallinem Korn und  
amorpher Restphase derartig ausgleichen, daß die  
resultierende Sättigungsmagnetostruktion sehr klein ist oder  
35 möglichst ganz verschwindet.

Gleichzeitig bewirkt das Erhitzen einen Abbau mechanischer Spannungen im Band und im gewickelten Magnetkern, so daß die Entstehung des nanokristallinen Kornes im spannungsfreien Zustand stattfindet und keine spannungsinduzierten

5 Anisotropien entstehen können.

Eine besonders hohe Linearität der Hystereseschleife läßt sich erzielen, wenn das Verhältnis des mechanischen elastischen Spannungstensors des Magnetkerns multipliziert mit der Sättigungsmagnetostriktion zur uniaxialen Anisotropie  
10 kleiner als 0,5 ist.

Die Feldstärke des senkrecht zum gewickelten Band angelegten Magnetfeldes (Querfeld) ist derart gewählt, daß es deutlich  
15 größer ist als die zum Erreichen der Sättigungsinduktion in dieser Richtung des Kerns notwendigen Feldstärke. Diese ist in der Regel größer als 100 A/cm.

Es liegt im Rahmen der Erfindung, zwei aufeinanderfolgende  
20 Wärmebehandlungen durchzuführen. Die erste Wärmebehandlung dient der Ausbildung der nanokristallinen Zweiphasenstruktur. Die zweite Wärmebehandlung kann bei einer niedrigeren Temperatur als die erste Wärmebehandlung erfolgen und dient der Ausbildung der Anisotropieachse. Alternativ wird in  
25 derselben Wärmebehandlung zunächst die nanokristalline Zweiphasenstruktur ausgebildet und anschließend die Anisotropieachse induziert.

Werden z.B. Permeabilitäten im unteren Bereich des  
30 angegebenen Fensters von 12000 - 300000 gefordert, kann die Erzeugung der nanokristallinen Struktur und die Ausbildung der Anisotropieachse auch gleichzeitig erfolgen. Hierzu wird der Magnetkern auf die Zieltemperatur erhitzt, dort bis zur Ausbildung der nanokristallinen Struktur gehalten und danach  
35 wieder auf Raumtemperatur abgekühlt. Je nach erforderlicher Permeabilität wird das Querfeld entweder während der gesamten

Wärmebehandlung angelegt oder erst nach Erreichen der Zieltemperatur oder sogar noch später eingeschaltet.

Das Erhitzen auf die Zieltemperatur erfolgt möglichst schnell. Beispielsweise erfolgt das Erhitzen auf die Zieltemperatur mit einer Rate zwischen 1 bis 15 K/min. Zur Erzielung eines inneren Temperatenausgleiches im Kern kann dabei im Temperaturbereich der einsetzenden Kristallisation eine verzögerte Aufheizrate unter 1 K/min oder sogar ein mehrminütiges Temperaturplateau eingelegt werden.

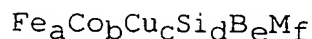
Der Magnetkern wird beispielsweise zwischen 4 Minuten und 8 Stunden auf der Zieltemperatur um 550 °C gehalten, um ein möglichst kleines Korn mit homogener Korngrößenverteilung und kleinen intergranularen Abständen zu erreichen. Die Temperatur wird dabei umso höher gewählt, je niedriger der Si- Gehalt in der Legierung ist. Dabei stellt beispielsweise das Einsetzen unmagnetischer Boridphasen oder das Wachsen von Oberflächenkristalliten auf dem Band eine Obergrenze für die Zieltemperatur dar.

Zur Einstellung der Anisotropieachse und damit der linearen Hystereseschleife (F-Schleife) wird der Magnetkern zwischen 0,1 und 8 Stunden unterhalb der Curie-Temperatur, z.B. zwischen 260 °C und 590 °C bei eingeschaltetem transversalem Magnetfeld gehalten. Die hierbei induzierte uniaxiale Anisotropie ist umso größer je höher die Temperatur im Querfeld gewählt wird. Das Permeabilitätsniveau verhält sich dazu reziprok, so daß bei den niedrigsten Temperaturen die höchsten Werte entstehen. Anschließend wird der Kern z.B. mit 0,1 bis 5 K/min im anliegenden Querfeld auf raumtemperaturnahe Werte von z.B. 25 °C oder z.B. 50 °C abgekühlt. Dies ist einerseits aus wirtschaftlichen Gründen vorteilhaft, andererseits kann aus Linearitätsgründen unterhalb der Curie-Temperatur nicht feldfrei abgekühlt werden kann.

Das Magnetfeld kann während der gesamten Wärmebehandlung eingeschaltet sein.

- Die Zusammensetzung der Legierung wird derart gewählt, daß
- 5 einerseits eine möglichst gute Ausmittlung der Kristallanisotropie des nanokristallinen Kornes erfolgt, andererseits aber der Nulldurchgang der Sättigungsmagnetostriktion möglichst gut getroffen wird. Gleichzeitig darf jedoch der Metalloidgehalt nicht zu hoch
- 10 angesetzt werden, da hierdurch das Band versprödet und Gießbarkeit, Wickelbarkeit und Schneidbarkeit des Bandes verloren gehen. Andererseits soll jedoch die Kristallisationstemperatur möglichst hoch sein, damit z.B. während des Gießprozesses des Bandes keine Keime für
- 15 Oberflächenkristallite entstehen, die für die Linearität der Schleife äußerst schädlich sind. Letzteres läßt sich in gewissen Grenzen z.B. durch erhöhte Gehalte an B und/oder Nb erreichen.
- 20 Aufgrund der hohen Permeabilität kann der Stromwandler bei zugleich exakter Stromerfassung ein besonders kleines Volumen aufweisen.

- Eine weitere Verbesserung hinsichtlich der Linearität der
- 25 Hystereseschleife des Magnetkerns und damit des Übertragungsverhaltens des Stromwandlers läßt sich erzielen, wenn der Magnetkern einen Magnetostriktionswert  $|\lambda_s| < 0,2$  ppm aufweist und der Magnetkern eine nanokristalline, ferromagnetische Legierung enthält, die eine Zusammensetzung
- 30 aufweist, die im wesentlichen aus der Formel



- besteht, worin M zumindest eines der Elemente V, Nb, Ta, Ti,
- 35 Mo, W, Zr und Hf ist, a, b, c, d, e, f in Atom-% angegeben sind und a, b, c, d, e und f die folgenden Bedingungen erfüllen:

$c = 1$ ;  $14 \leq d \leq 17$ ;  $5 \leq e \leq 14$ ;  $2 \leq f \leq 4$ ; mit  $22 \leq d + e \leq 24$  und  $0 \leq b \leq 0.5$ , wobei  $a + b + c + d + e + f = 100$  sind.

- 5 Die obengenannten Legierungssysteme zeichnen sich durch sehr lineare, ausgesprochen schmale Hystereseschleifen aus und weisen je nach dabei eingestellter uniaxialer Anisotropie  $K_u$  bei einer Feldamplitude von  $\hat{H} = 4$  mA/cm eine Permeabilität von  $12000 < \mu_4 < 300000$  auf. In Figur 3 sind
- 10 Hystereseschleifen von Magnetkernen aus einigen der obengenannten Legierungssysteme gezeigt. Diese Legierungssysteme sind nahezu magnetostriktionsfrei. Die Magnetostruktion wird vorzugsweise durch eine Wärmebehandlung
- 15 eingestellt, so daß lineare Hystereseschleifen mit einem aufgrund der hohen Sättigungsinduktion von  $B_s = 1,1$  bis  $1,4$  T weiträumig nutzbaren Induktionsbereich und einem sehr guten Frequenzgang bezüglich der Permeabilität und niedrigen Ummagnetisierungsverlusten herstellbar sind.
- 20 Bei dem oben erwähnten bevorzugten nanokristallinen Legierungssystem wird durch eine exakt abgegliche Temperatur-Haltezeitfunktion ausgenutzt, daß sich bei den erfindungsgemäß eingesetzten Legierungszusammensetzungen gerade die Magnetostriktionsbeiträge von feinkristallinem
- 25 Korn und amorpher Restphase ausgleichen und die erforderliche Magnetostriktionsfreiheit entsteht.

- Vorzugsweise weist der Magnetkern keinen Luftspalt auf. Ein Stromwandler mit einem Magnetkern ohne Luftspalt weist eine
- 30 besonders hohe Immunität gegenüber externen Fremdmagnetfeldern ohne zusätzliche Abschirmmaßnahmen auf. Der Magnetkern ist beispielsweise ein geschlossener, luftspaltloser Ringkern, Ovalkern oder Rechteckkern. Weist der Kern eine Rotationssymmetrieachse auf, so ist die
- 35 Anisotropieachse parallel zur Rotationssymmetrieachse. Auf jeden Fall steht diese Anisotropieachse möglichst exakt senkrecht zur Richtung des gewickelten Bandes.

Zur Erzeugung des Magnetkerns kann das Band rund gewickelt werden und falls erforderlich mittels geeigneter Formgebungswerkzeuge während der Wärmebehandlung in die  
5 entsprechende Form gebracht werden.

Besonders kleine Koerzitivfeldstärken und damit eine besonders gute Linearität der Hystereseschleife werden erzielt, wenn das Band zumindest an einer Oberfläche mit  
10 einer elektrisch isolierenden Schicht versehen ist. Dies bewirkt einerseits eine bessere Entspannung des Magnetkerns, andererseits lassen sich auch besonders niedrige Wirbelstromverluste erreichen.

15 Das Band wird beispielsweise vor dem Wickeln an mindestens einer seiner beiden Oberflächen mit der elektrisch isolierenden Schicht versehen. Hierfür wird je nach Anforderung an die Güte der isolierenden Schicht, ein Tauch-, Durchlauf-, Sprüh- oder Elektrolyseverfahren am Band  
20 eingesetzt.

Alternativ wird der gewickelte Magnetkern vor Erhitzen auf die Zieltemperatur einer Tauchisolation unterzogen, so daß das Band mit der elektrisch isolierenden Schicht versehen  
25 wird. Als besonders vorteilhaft hat sich ein Tauchverfahren bei Unterdruck herausgestellt.

Bei der Auswahl des isolierenden Mediums ist darauf zu achten, daß dieses einerseits auf der Bandoberfläche gut  
30 haftet, andererseits keine Oberflächenreaktion verursacht, die zu einer Schädigung der Magneteigenschaften führen kann. Bei den hier in Rede stehenden Legierungen haben sich Oxide, Acrylate, Phosphate, Silikate und Chromate der Elemente Calcium, Magnesium, Aluminium, Titan, Zirkonium, Hafnium,  
35 Silizium als wirkungsvolle und verträgliche Isolatoren herausgestellt. Besonders effektiv ist dabei Magnesium, welches als flüssiges magnesiumhaltiges Vorprodukt auf die

Bandoberfläche aufgebracht wird und sich während einer speziellen, die Legierung nicht beeinflussenden Wärmebehandlung in eine dichte magnesiumhaltige Schicht umwandelt, deren Dicke D je nach Verarbeitung ungefähr  
5 zwischen 25 nm und 3  $\mu$ m liegen kann. Bei den Temperaturen der oben beschriebenen Magnetfeldwärmebehandlung entsteht dann die eigentliche Isolatorschicht aus Magnesiumoxid.

Die Sekundärwicklung des Stromwandlers kann eine Windungszahl  
10 aufweisen, die kleiner oder gleich 2200 ist. Die Primärwicklung des Stromwandlers kann eine Windungszahl aufweisen, die gleich drei ist. Der Stromwandler kann für einen Primärstrom ausgelegt sein, der kleiner oder gleich 20A beträgt.

15 Das Band wird zunächst in amorphem Zustand mittels Rascherstarrungstechnologie hergestellt, wie sie z.B. in der EP 0 271 657 B1 beschrieben ist, und dann auf speziellen Maschinen spannungsfrei zum Magnetkern in seinen  
20 Endabmessungen gewickelt. Aufgrund der hohen Linearitätsanforderungen an die Hystereseschleife des Magnetkerns wird vorzugsweise besondere Sorgfalt im Hinblick auf Spannungsfreiheit aufgewendet.

25 Vorzugsweise wird das Band so hergestellt, daß es eine kleine effektive Rauhtiefe aufweist. Dadurch lassen sich ein besonders gutes Remanenzverhältnis und damit eine besonders gute Linearität des Stromwandlers erzielen. Es hat sich gezeigt, daß 7 % als oberer Grenzwert für die effektive  
30 Rauhtiefe besonders gut ist, wobei jedoch mit abnehmender effektiver Rauhtiefe die Streuung aber auch der Betrag der Remanenz kleiner wird und damit die Stabilität der Linearität signifikant zunimmt.

35 Die Rauhtiefe der Oberflächen des Bandes und auch die Banddicken sind wesentliche Einflußgrößen auf die magnetischen Eigenschaften. Maßgeblich ist die effektive



Rauhtiefe. Unter der effektiven Rauhtiefe versteht man die Summe der mittleren Rauhtiefen  $R_a$  der beiden sich gegenüberliegenden Bandoberflächen dividiert durch die Banddicke. Die Figur 4 zeigt sehr anschaulich, daß sich das Remanenzverhältnis und damit die Linearität der Stromwandler durch Einstellung der Rauhtiefe einstellen läßt.

Besonders gleichmäßige und lineare Hystereseschleifen werden dann erreicht, wenn mehrere Magnetkerne während der Wärmebehandlung im Magnetfeld stirnseitig exakt so aufgestapelt sind, daß die Stapelhöhe das Mehrfache des Magnetkernaußendurchmessers beträgt. Die Hystereseschleife entwickelt sich dabei umso steiler, je niedriger die Temperatur im magnetischen Quersfeld angesetzt wird.

Je nach Legierung ist die Wärmebehandlung im Vakuum oder in einem inerten oder reduzierenden Schutzgas durchzuführen. In allen Fällen sind materialspezifische Reinheitsbedingungen zu berücksichtigen, die fallweise durch entsprechende Hilfsmittel wie elementspezifische Absorber- oder Gettermaterialien herbeizuführen sind.

Nach der Wärmebehandlung wird der Magnetkern schließlich verfestigt, z.B. durch Tränken, Beschichten, Umhüllen mit geeigneten Kunststoffmaterialien und/oder Verkapselung und mit jeweils mindestens der Sekundärwicklung des Stromwandlers versehen.

Im folgenden wird ein Ausführungsbeispiel der Erfindung anhand der Figuren näher erläutert.

Figur 5 zeigt im Vergleich die Abhängigkeit der Permeabilitäten des erfindungsgemäßen Magnetkerns und der von Permalloy-Kernen von einer Induktionsamplitude, die durch ein erregendes Magnetfeld erzeugt wird.

Figur 6 zeigt die Abhängigkeit des Amplitudenfehlers und des Phasenfehlers vom zu messenden Strom.

Figur 7 zeigt schematisch den Magnetkern, der aus einem Band mit einer isolierenden Schicht besteht, und seine Anisotropieachse.

Figur 8 zeigt die Temperaturabhängigkeit der Permeabilität des Magnetkerns bei einem Permeabilitätsniveau von ca. 80000 im Vergleich mit der einiger typischer Ferrite.

Figur 7 ist nicht maßstabsgetreu.

In einem Ausführungsbeispiel wurde ein 3 g schwerer ringförmiger Magnetkern M, der aus einem mit einer ca. 300 nm dicken isolierenden Schicht S aus Magnesiumoxid beschichteten Band B aus einer wärmebehandelten nanokristallinen Legierung mit der Zusammensetzung  $\text{Fe}_{73,42}\text{Cu}_{1,04}\text{Nb}_{2,96}\text{Si}_{15,68}\text{B}_{6,95}$  besteht, mit den Abmessungen  $19 \times 15 \times 5,2$  mm und mit einem Eisenquerschnitt von  $A_{\text{Fe}} = 0,077 \text{ cm}^2$  erzeugt.

Zur Vermeidung von Wickelspannungen wurde beim Wickeln des Bandes B zum Magnetkern M darauf geachtet, daß die Zugkraft des Bandes B mit zunehmender Bandlagenzahl kontinuierlich zurückgeht. Damit wird erreicht, daß das tangential am Magnetkern M angreifende Drehmoment über den gesamten Radius des Magnetkerns M konstant bleibt und nicht mit wachsendem Radius größer wird.

Zur Erzielung der geforderten Magneteigenschaften wurde der Magnetkern M bei  $572^\circ\text{C}$  vorbehandelt, wodurch sich infolge der Ausbildung der nanokristallinen Zweiphasenstruktur der Betrag der Sättigungsmagnetostriktion von  $\lambda_s \approx 24 \text{ ppm}$  auf  $0,16 \text{ ppm}$  reduzierte. Die Aufheizrate wurde zwischen  $450^\circ\text{C}$  und  $520^\circ\text{C}$  von z.B. 10 K/min auf 1 K/min reduziert. Nachdem der Kern

z.B. für 1 Stunde auf 572°C gehalten wurde, wurde er wieder abgekühlt.

5 Zur Einstellung der für flache lineare Hystereseschleifen (F-Schleifen) notwendigen uniaxialen Queranisotropie  $K_u$  wurde der Magnetkern M in einer weiteren Wärmebehandlung für 3,5 Stunden bei einer Temperatur von 382 °C getempert. Zur Ausrichtung der magnetischen Vorzugsrichtung, d.h. zur Erzeugung einer Anisotropieachse A wurde quer zur späteren  
10 Magnetisierungsrichtung ein äußeres Magnetfeld ( $H > 1000$  A/cm) angelegt, das transversal zur Richtung des gewickelten Bandes B steht (siehe Figur 7). Das Magnetfeld war also parallel zur Anisotropieachse A.

15 Die magnetischen Eigenschaften des zweiteilig wärmebehandelten Magnetkerns M geht aus Fig. 5 hervor, wobei die Permeabilität im Gegensatz zu konventionellen kristallinen Permalloy-Kernen über einen weiten Aussteuerungsbereich hinweg nahezu konstant auf dem hohen  
20 Wert  $\mu \approx 82.000$  lag. Dies wurde möglich, da einerseits die eingesetzte Legierung eine hohe Sättigungsinduktion von ca. 1,2 Tesla besitzt und andererseits das statische Verhältnis Remanenz- zu Sättigungsinduktion infolge der durch die Vorbehandlung hinreichend stark reduzierten  
25 Sättigungsmagnetostriktion sowie einer geringen effektiven Rauhtiefe ( $R_{a(eff)} \approx 2,9 \%$ ) mit  $B_r/B_m = 2,6 \%$  ausreichend klein war.

Der Magnetkern M wurde zu einem Stromwandler  
30 weiterverarbeitet. Der Stromwandler wies eine Primärwindungszahl  $N_1$  von 3 und eine Sekundärwindungszahl  $N_2$  von 2000 auf und war über einen Bürdenwiderstand von 100 Ohm niederohmig im Sekundärstromkreis abgeschlossen. Die anwendungsrelevanten Größen Amplitudenfehler F und  
35 Phasenfehler  $\phi$  gehen aus Fig. 6 hervor. Bedingt durch die ausgeprägte Linearität und hohe Permeabilität der Hystereseschleife sind beide Größen betragsmäßig klein und

ihre Aussteuerungsabhängigkeit vergleichsweise gering ist. Der mittlere Phasenwinkel  $\varphi$  beträgt  $0,40^\circ$ . Eine Linearität des Phasenwinkels  $\Delta\varphi$  über einen Strombereich von 0,1 bis 2 A beträgt weniger als  $0,04^\circ$ .

5

Der Magnetkern M wies eine hervorragende Alterungsbeständigkeit bis zu  $150^\circ\text{C}$  auf. Darüber hinaus zeigt Fig. 8 die hervorragend kleine Temperaturabhängigkeit des aus besagter nanokristalliner Legierung hergestellten Magnetkerns M, wobei sich gerade das eingestellte Permeabilitätsniveau um 80000 besonders auszeichnet.

10

Insgesamt war dieses Glühergebnis praktisch unabhängig davon, ob die beschriebene Wärmebehandlung als zwei unabhängige Teilschritte oder in einem einzigen Ablauf durchgeführt wurde.

15

Zur noch vollständigeren Reduzierung der Magnetostriktion wurde die thermische Vorbehandlung versuchsweise bei  $T_x = 600^\circ\text{C}$  durchgeführt. Das Glühergebnis war allerdings deutlich schlechter, denn im Gegensatz zu den oben beschriebenen hervorragenden Linearitätseigenschaften besaß die Schleife jetzt plötzlich ein hohes Remanenzverhältnis von  $B_r/B_m = 23,5\%$ , wobei die Anfangspermeabilität nur noch bei  $\mu_0 \approx 48.000$  lag.

25

Nach einer Vorbehandlung bei  $T_x = 520^\circ\text{C}$  reagierten die Magneteigenschaften des Magnetkerns infolge zu hoher Sättigungsmagnetostriktion sehr empfindlich auf mechanisch verspannende Einflüsse jeglicher Art. Dabei wuchs das Remanenzverhältnis bereits bei schwachen mechanischen Manipulationen von 6 % auf 20 % oder mehr an. Demzufolge war eine Verkapselung oder Kunststoffbeschichtung und damit die technologische Weiterverarbeitung des Magnetkerns zum Stromwandlerbauelement nicht mehr möglich.

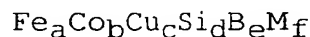
35

Wurde dagegen die Vorbehandlungstemperatur von  $T_x = 572\text{ °C}$  beibehalten, aber die Temperatur der Feldwärmebehandlung auf  $440\text{ °C}$  erhöht, behielt die Hystereseschleife zwar ihre hervorragende Linearität mit einem Remanenzverhältnis von  
5 jetzt  $B_r/B_m = 2,4\%$ , aber ihre Anfangspermeabilität lag aufgrund einer zu hohen uniaxialen Anisotropieenergie  $K_u$  nur noch bei  $\mu_1 \approx 56.000$ .

3  
2  
1

## Patentansprüche

1. Magnetkern, der zum Einsatz in einem Stromwandler geeignet ist, dadurch gekennzeichnet, daß
- 5 - er aus einem gewickelten Band (B) aus einer ferromagnetischen Legierung besteht, bei der mindestens 50% des Volumens der Legierung durch feine kristalline Teilchen mit einer mittleren Teilchengröße von 100 nm oder weniger eingenommen wird (nanokristalline Legierung),
- 10 - er eine Permeabilität aufweist, die größer als 12000 und kleiner als 300000 ist,
- er eine Sättigungsmagnetostriktion aufweist, deren Betrag kleiner als 1 ppm ist,
- er im wesentlichen frei von mechanischen Spannung ist,
- 15 - er eine Anisotropieachse (A) aufweist, entlang der sich die Magnetisierung des Magnetkerns (M) besonders leicht ausrichtet und die senkrecht zu einer Ebene ist, in der eine Mittellinie des Bandes (B) verläuft,
- die Legierung eine Zusammensetzung aufweist, die im
- 20 wesentlichen aus der Formel



- besteht, worin M zumindest eines der Elemente V, Nb, Ta, Ti, Mo, W, Zr und Hf ist, a, b, c, d, e, f in Atom-% angegeben sind, und wobei a, b, c, d, e und f die folgenden Bedingungen erfüllen:
- 25

- $0,5 \leq c \leq 2$ ;  $6,5 \leq d \leq 18$ ;  $5 \leq e \leq 14$ ;  $1 \leq f \leq 6$ ;
- 30 mit  $d + e > 18$  und  $0 \leq b \leq 15$ , wobei  $a + b + c + d + e + f = 100$  sind.

2. Magnetkern nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß
- 35 a, b, c, d, e und f die folgenden Bedingungen erfüllen:

21

$c = 1$ ;  $14 \leq d \leq 17$ ;  $5 \leq e \leq 14$ ;  $2 \leq f \leq 4$ ;  $0 \leq b \leq 0,5$ ; mit  
 $22 < d + e \leq 24$ .

3. Magnetkern nach Anspruch 2,

5   dadurch gekennzeichnet,  
daß der Betrag der Sättigungsmagnetostriktion kleiner als 0,2  
ppm ist.

4. Magnetkern nach einem der Ansprüche 1 bis 3,

10   dadurch gekennzeichnet,  
daß der Magnetkern (M) eine Sättigungsmagnetisierung  $B_s$  von  
1,1 bis 1,4 T aufweist.

5. Magnetkern nach einem der Ansprüche 1 bis 4,

15   dadurch gekennzeichnet, daß  
das Band (B) eine Rauhtiefe  $R_a(\text{eff})$  kleiner als 7% aufweist.

6. Magnetkern nach einem der Ansprüche 1 bis 5,

20   dadurch gekennzeichnet,  
daß das Band (B) zumindest an einer Oberfläche mit einer  
elektrisch isolierenden Schicht (S) versehen ist.

7. Magnetkern nach Anspruch 6,

25   dadurch gekennzeichnet,  
daß als elektrisch isolierende Schicht (S) eine Schicht aus  
Magnesiumoxid vorgesehen ist.

8. Magnetkern nach Anspruch 7,

30   dadurch gekennzeichnet,  
daß die elektrisch isolierende Schicht (S) eine Dicke D von  
 $25 \text{ nm} \leq D \leq 3 \mu\text{m}$  aufweist.

9. Magnetkern nach einem der Ansprüche 1 bis 8,

35   dadurch gekennzeichnet, daß  
er als ein geschlossener, luftspaltloser Ringkern, Ovalkern  
oder Rechteckkern ausgestaltet ist.

10. Magnetkern nach einem der Ansprüche 1 bis 9,  
dadurch gekennzeichnet, daß  
das Verhältnis seines mechanischen elastischen  
Spannungstensors multipliziert mit der  
5 Sättigungsmagnetostriktion zu seiner uniaxialen Anisotropie  
kleiner als 0,5 ist.
11. Stromwandler für Wechselstrom mit einem Magnetkern nach  
einem der Ansprüche 1 bis 10, wobei der Stromwandler neben  
10 dem Magnetkern (M) als Wandlerkern aus zumindest einer  
Primärwicklung und zumindest einer Sekundärwicklung, zu der  
ein Bürdenwiderstand parallel geschaltet ist und der den  
Sekundärstromkreis niederohmig abschließt, besteht.
12. Stromwandler nach Anspruch 11,  
dadurch gekennzeichnet, daß die  
Sekundärwicklung eine Windungszahl  $N_{\text{sec}} \leq 2200$  aufweist,  
wobei die Primärwicklung eine Windungszahl  $N_{\text{prim}} = 3$  aufweist  
und der Stromwandler für einen Primärstrom  $I_{\text{prim}} \leq 20 \text{ A}$   
20 ausgelegt ist.
13. Verfahren zur Herstellung eines Magnetkerns nach einem  
der Ansprüche 1 bis 12,  
- bei dem nach Herstellung und Wicklung des Bandes (B) zum  
25 Magnetkern (M), der Magnetkern (M) auf eine Zieltemperatur  
zwischen  $450^\circ\text{C}$  und  $600^\circ\text{C}$  erhitzt wird,  
- bei dem der Magnetkern (M) bei einer Temperatur unterhalb  
der Curie-Temperatur der Legierung für 0,1 bis 8 Stunden  
bei Temperaturen zwischen  $260^\circ\text{C}$  und  $590^\circ\text{C}$  einem  
30 Magnetfeld von mehr als  $100 \text{ A/cm}$  ausgesetzt wird, das  
parallel zur auszubildenden Anisotropieachse (A) des  
Magnetkerns (M) ist.
14. Verfahren nach Anspruch 13,  
35 - bei dem das Erhitzen auf die Zieltemperatur mit einer Rate  
zwischen 0,5 bis  $15 \text{ K/min}$  erfolgt,



- bei dem der Magnetkern (M) zwischen 4 Minuten und 8 Stunden auf der Zieltemperatur gehalten wird.

15. Verfahren nach einem der Ansprüche 13 bis 14,

- 5 - bei dem das Band (B) vor dem Wickeln an mindestens einer seiner beiden Oberflächen mit einer elektrisch isolierenden Schicht (S) versehen wird.

16. Verfahren nach einem der Ansprüche 13 bis 15,

- 10 - bei dem der Magnetkern (M) vor Erhitzen auf die Zieltemperatur einer Tauchisolation unterzogen wird, so daß das Band (B) mit einer elektrisch isolierenden Schicht (S) versehen wird.

15 17. Verfahren nach einem der Ansprüche 13 bis 16,

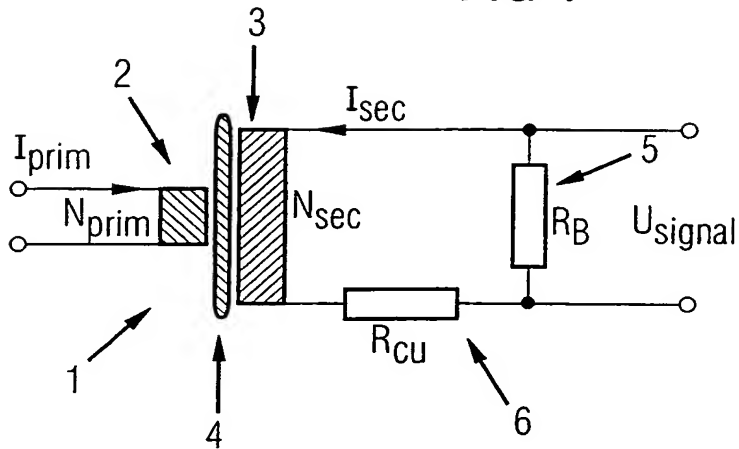
- bei dem zumindest während der Behandlung im Magnetfeld mehrere gleiche Magnetkerne (M) stirnseitig derart übereinander gestapelt sind, daß eine Stapelhöhe das Mehrfache des Außendurchmessers des Magnetkerns (M) beträgt.

18. Verfahren nach einem der Ansprüche 13 bis 17,

- bei dem der Magnetkern (M) mit Raten von 0,1 bis 5 K/min auf Raumtemperatur abgekühlt wird.

1/4

FIG 1



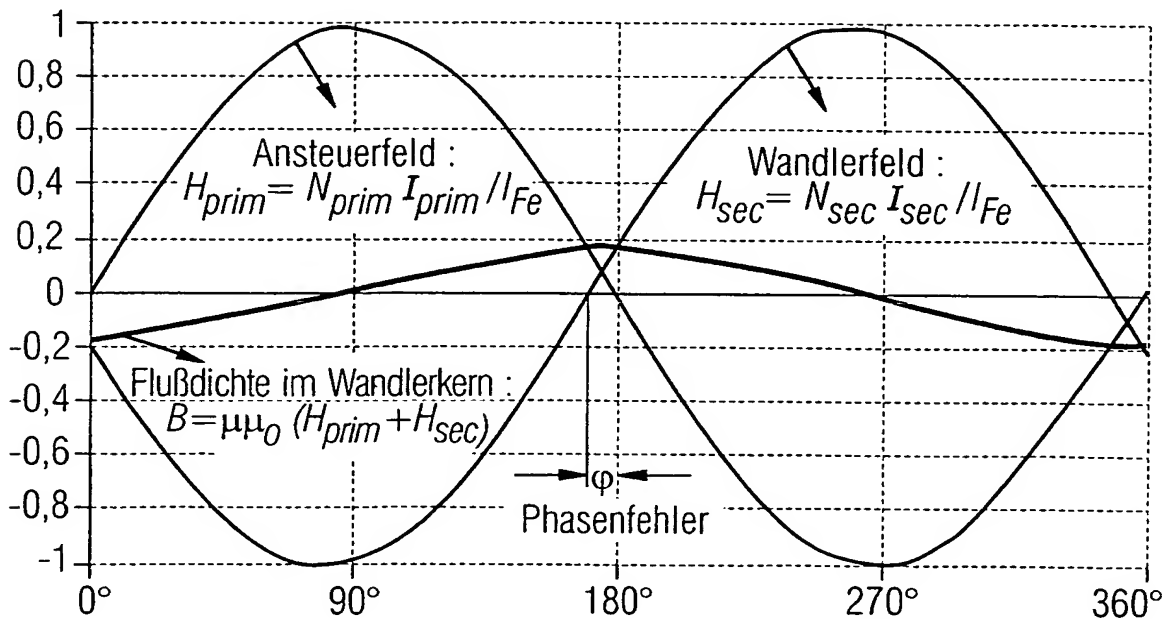
Typische Daten:

 $N_{\text{prim}} : 1 \dots 6$  $I_{\text{prim}} : 5 \text{ A}_{\text{eff}} \dots 120 \text{ A}_{\text{eff}} (\text{max.})$  $N_{\text{sec}} : 500 \dots 4000$  $I_{\text{sec}} \approx -I_{\text{prim}} \cdot N_{\text{prim}} / N_{\text{sec}}$  $R_B : 1 \Omega \dots 200 \Omega (\text{Bürde})$  $R_{\text{cu}} : 1 \Omega \dots 200 \Omega (\text{Wicklung})$  $U_{\text{signal}} : 300 \text{ mV}_{\text{eff}} (\text{max.})$ 

Frequenz : 50 / 60 Hz

$$\frac{B}{\mu\mu_0 \hat{H}_{\text{prim}}}$$

FIG 2



2/4

FIG 3

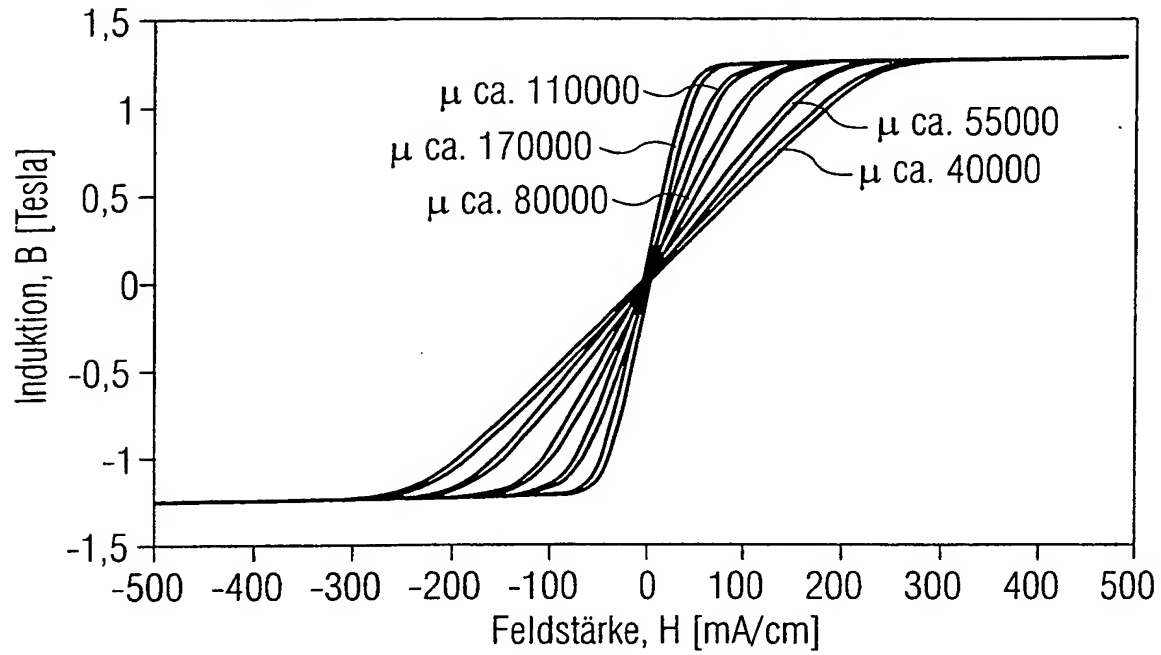
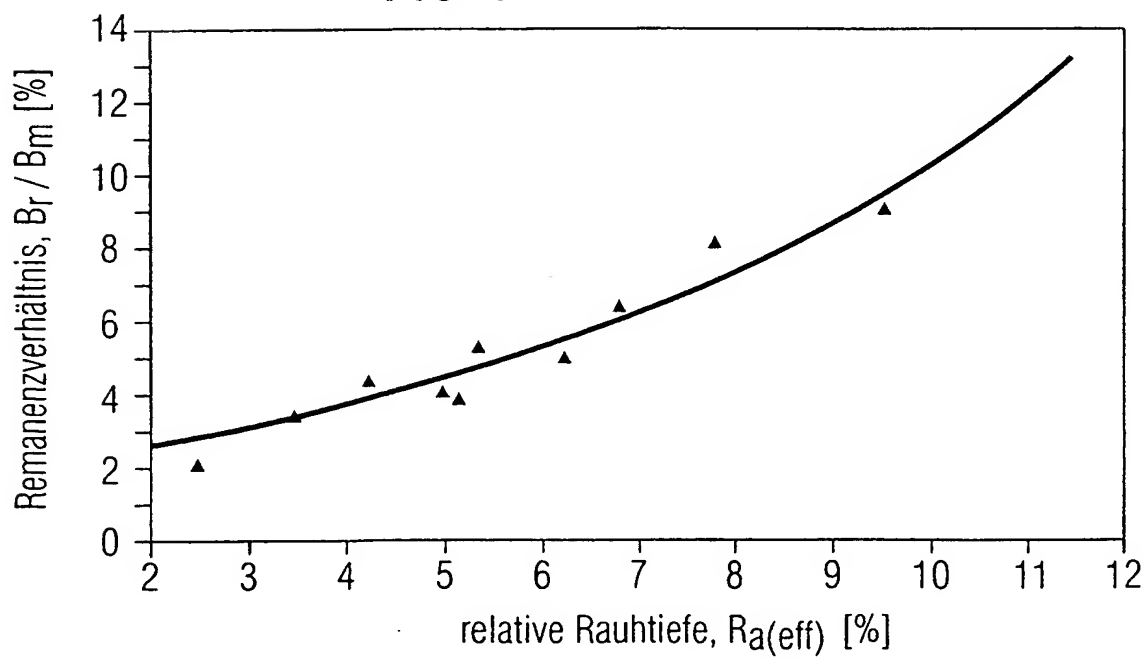


FIG 4



3/4

FIG 5

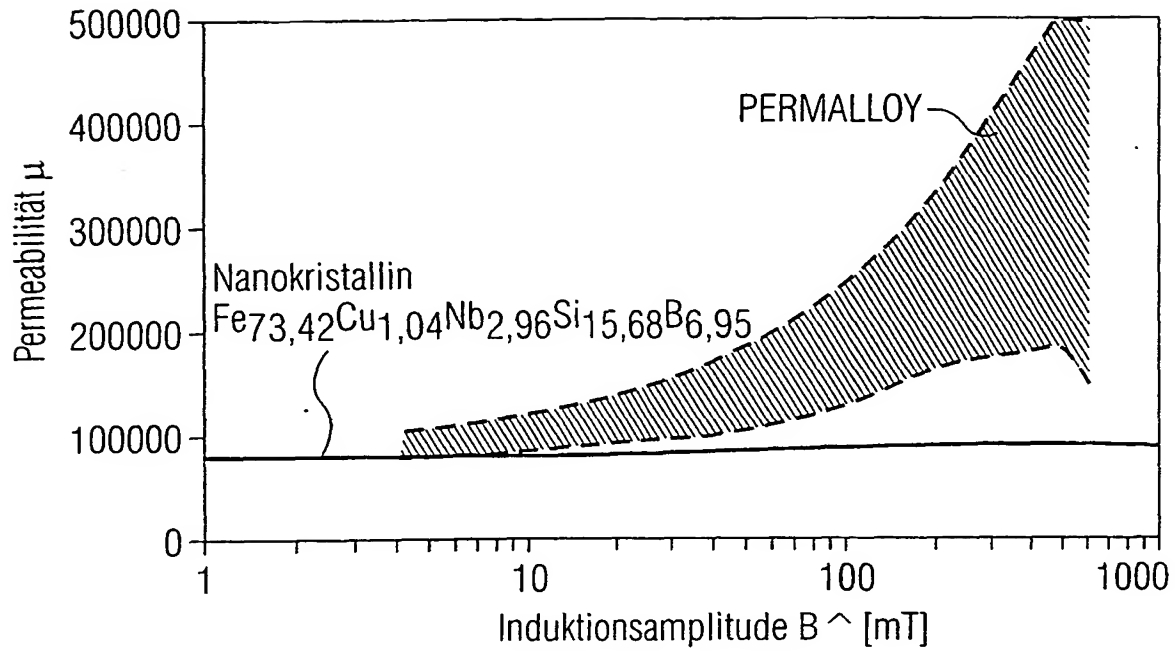
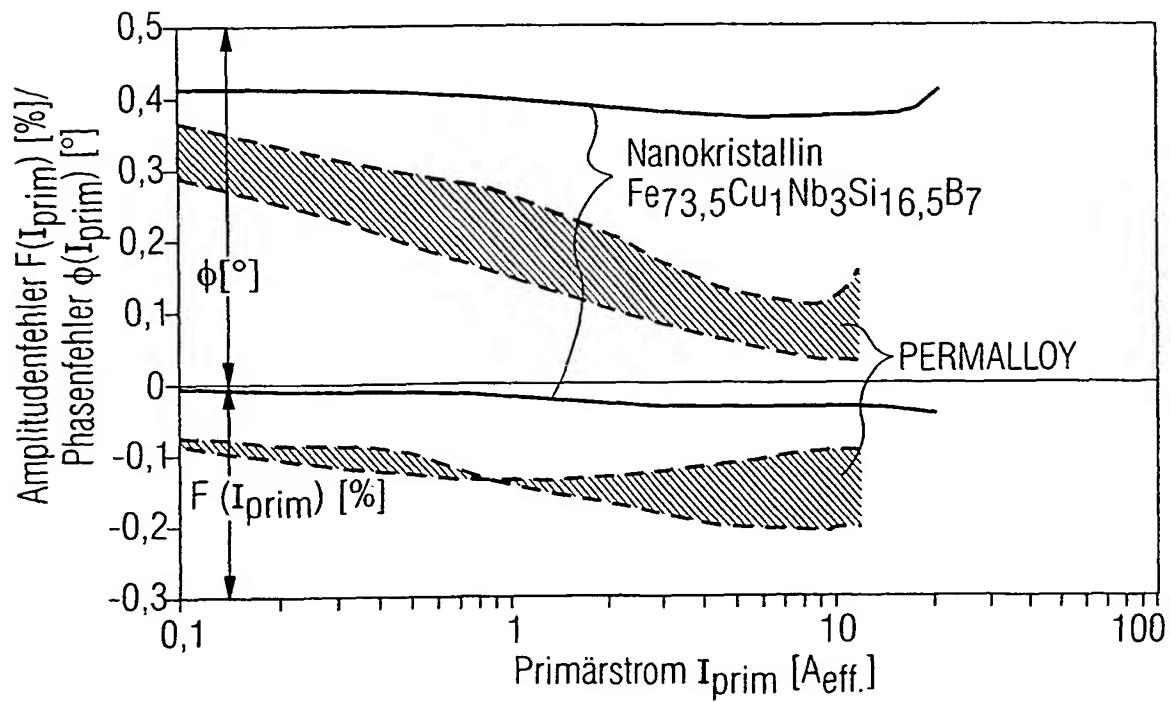


FIG 6



4/4

FIG 7

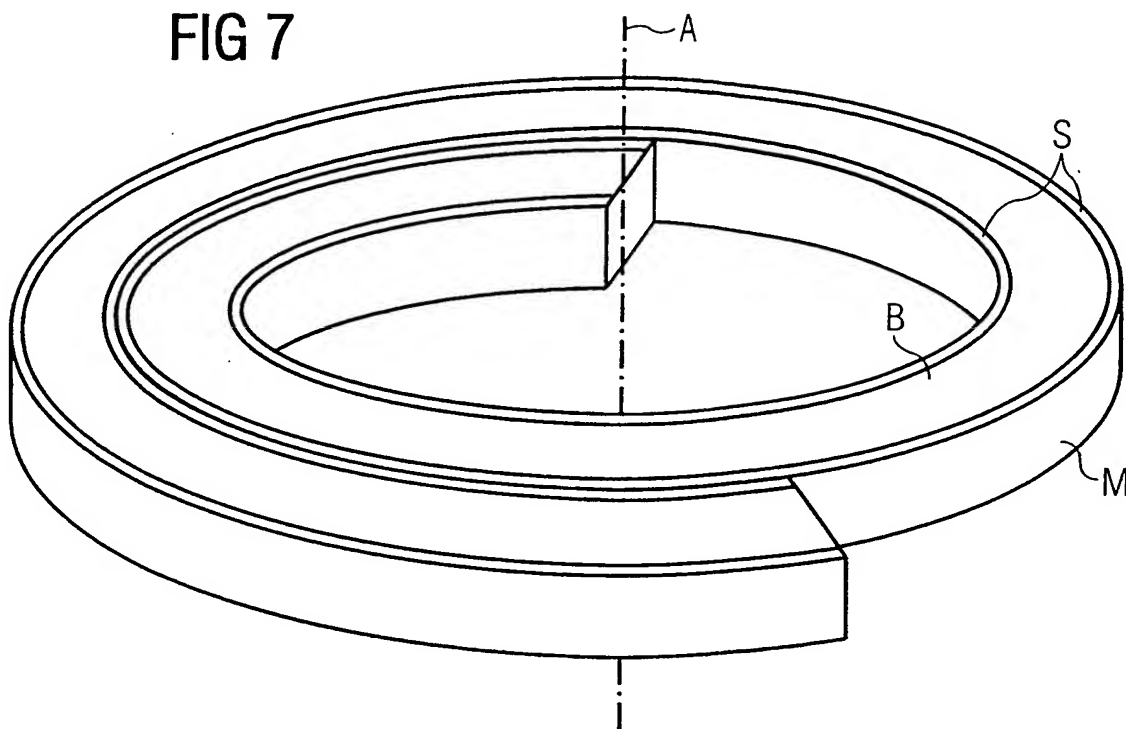
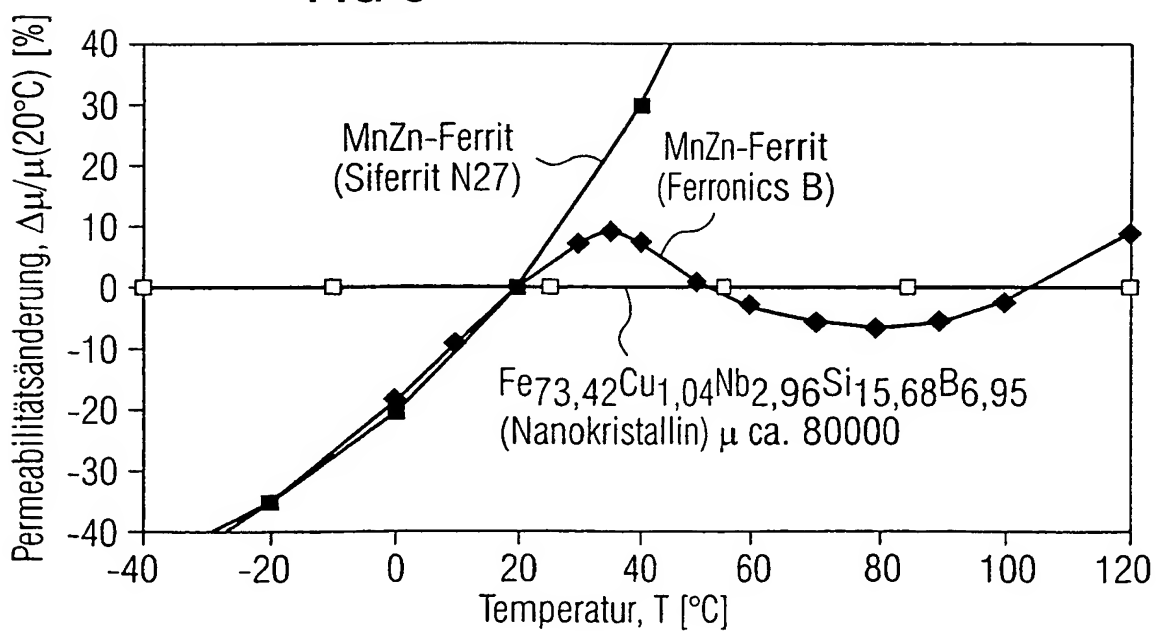


FIG 8



## INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International Application No

PCT/DE 99/03631

**A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER**  
IPC 7 H01F38/28 H01F1/153

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

**B. FIELDS SEARCHED**

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

IPC 7 H01F

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practical, search terms used)

**C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT**

Category *	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
Y	EP 0 271 657 A (HITACHI METALS LTD) 22 June 1988 (1988-06-22) cited in the application	1,4
A	page 7, line 43 -page 8, line 55; claims 1,2,7,22-24; figures 9,10,28; tables 1-4	2,3,6, 13-15
Y	EP 0 563 606 A (VACUUMSCHMELZE GMBH) 6 October 1993 (1993-10-06)	1,4
A	claims 1,3,7-9; figures 5A,6	9,11,13

☐ Further documents are listed in the continuation of box C.☒ Patent family members are listed in annex.

\* Special categories of cited documents :

"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance

"E" earlier document but published on or after the international filing date

"L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)

"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means

"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention

"X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone

"Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art

"&amp;" document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search

25 February 2000

Date of mailing of the international search report

02/03/2000

Name and mailing address of the ISA

European Patent Office, P.B. 5818 Patentlaan 2  
NL - 2280 HV Rijswijk  
Tel. (+31-70) 340-2040, Tx. 31 651 epo nl,  
Fax: (+31-70) 340-3018

Authorized officer

Decanniere, L

# INTERNATIONAL SEARCH REPORT

information on patent family members

International Application No

PCT/DE 99/03631

Patent document cited in search report	Publication date	Patent family member(s)	Publication date
EP 0271657 A	22-06-1988	CA 1323219 A	19-10-1993
		DE 3779070 A	17-06-1992
		JP 2040464 C	28-03-1996
		JP 3219009 A	26-09-1991
		JP 7074419 B	09-08-1995
		KR 9103977 B	17-06-1991
		US 4881989 A	21-11-1989
		US 5160379 A	03-11-1992
		JP 1079342 A	24-03-1989
		JP 1841284 C	25-04-1994
		JP 4004393 B	28-01-1992
		JP 6010104 A	18-01-1994
		JP 6041700 A	15-02-1994
		JP 6010105 A	18-01-1994
		JP 7011396 A	13-01-1995
EP 0563606 A	06-10-1993	DE 4210748 C	16-12-1993
		AT 168496 T	15-08-1998
		DE 59308759 D	20-08-1998
		ES 2118844 T	01-10-1998

# INTERNATIONALER RECHERCHENBERICHT

Intern. Aktenzeichen

PCT/DE 99/03631

A. KLASSIFIZIERUNG DES ANMELDUNGSGEGENSTANDES  
IPK 7 H01F38/28 H01F1/153

Nach der internationalen Patentklassifikation (IPK) oder nach der nationalen Klassifikation und der IPK

## B. RECHERCHIERTE GEBIETE

Recherchiertes Mindestprüfstoff (Klassifikationssystem und Klassifikationssymbole)  
IPK 7 H01F

Recherchierte aber nicht zum Mindestprüfstoff gehörende Veröffentlichungen, soweit diese unter die recherchierten Gebiete fallen

Während der internationalen Recherche konsultierte elektronische Datenbank (Name der Datenbank und evtl. verwendete Suchbegriffe)

## C. ALS WESENTLICH ANGESEHENE UNTERLAGEN

Kategorie*	Bezeichnung der Veröffentlichung, soweit erforderlich unter Angabe der in Betracht kommenden Teile	Betr. Anspruch Nr.
Y	EP 0 271 657 A (HITACHI METALS LTD) 22. Juni 1988 (1988-06-22) in der Anmeldung erwähnt	1,4
A	Seite 7, Zeile 43 -Seite 8, Zeile 55; Ansprüche 1,2,7,22-24; Abbildungen 9,10,28; Tabellen 1-4	2,3,6, 13-15
Y	EP 0 563 606 A (VACUUMSCHMELZE GMBH) 6. Oktober 1993 (1993-10-06)	1,4
A	Ansprüche 1,3,7-9; Abbildungen 5A,6	9,11,13

☐ Weitere Veröffentlichungen sind der Fortsetzung von Feld C zu entnehmen

☒ Siehe Anhang Patentfamilie

\* Besondere Kategorien von angegebenen Veröffentlichungen :

\*A\* Veröffentlichung, die den allgemeinen Stand der Technik definiert, aber nicht als besonders bedeutsam anzusehen ist

\*E\* Älteres Dokument, das jedoch erst am oder nach dem internationalen Anmeldedatum veröffentlicht worden ist

\*L\* Veröffentlichung, die geeignet ist, einen Prioritätsanspruch zweifelhaft erscheinen zu lassen, oder durch die das Veröffentlichungsdatum einer anderen im Recherchenbericht genannten Veröffentlichung belegt werden soll oder die aus einem anderen besonderen Grund angegeben ist (wie ausgeführt)

\*O\* Veröffentlichung, die sich auf eine mündliche Offenbarung, eine Benutzung, eine Ausstellung oder andere Maßnahmen bezieht

\*P\* Veröffentlichung, die vor dem internationalen Anmeldedatum, aber nach dem beanspruchten Prioritätsdatum veröffentlicht worden ist

\*T\* Spätere Veröffentlichung, die nach dem internationalen Anmeldedatum oder dem Prioritätsdatum veröffentlicht worden ist und mit der Anmeldung nicht kollidiert, sondern nur zum Verständnis des der Erfindung zugrundeliegenden Prinzips oder der ihr zugrundeliegenden Theorie angegeben ist

\*X\* Veröffentlichung von besonderer Bedeutung; die beanspruchte Erfindung kann allein aufgrund dieser Veröffentlichung nicht als neu oder auf erfindertlicher Tätigkeit beruhend betrachtet werden

\*Y\* Veröffentlichung von besonderer Bedeutung; die beanspruchte Erfindung kann nicht als auf erfindertlicher Tätigkeit beruhend betrachtet werden, wenn die Veröffentlichung mit einer oder mehreren anderen Veröffentlichungen dieser Kategorie in Verbindung gebracht wird und diese Verbindung für einen Fachmann naheliegend ist

\*Z\* Veröffentlichung, die Mitglied derselben Patentfamilie ist

Datum des Abschlusses der internationalen Recherche

25. Februar 2000

Absenddatum des internationalen Recherchenberichts

02/03/2000

Name und Postanschrift der internationalen Recherchenbehörde  
Europäisches Patentamt, P.B. 5818 Patentlaan 2  
NL - 2280 HV Rijswijk  
Tel. (+31-70) 340-2040, Tx. 31 651 epo nl,  
Fax: (+31-70) 340-3018

Bevollmächtigter Bediensteter

Decanniere, L



# INTERNATIONALER RECHERCHENBERICHT

Angaben zu Veröffentlichungen, die zur selben Patentfamilie gehören

Inter. nationales Aktenzeichen

PCT/DE 99/03631

Im Recherchenbericht angeführtes Patentdokument	Datum der Veröffentlichung	Mitglied( r) der Patentfamilie	Datum der Veröffentlichung
EP 0271657 A	22-06-1988	CA 1323219 A	19-10-1993
		DE 3779070 A	17-06-1992
		JP 2040464 C	28-03-1996
		JP 3219009 A	26-09-1991
		JP 7074419 B	09-08-1995
		KR 9103977 B	17-06-1991
		US 4881989 A	21-11-1989
		US 5160379 A	03-11-1992
		JP 1079342 A	24-03-1989
		JP 1841284 C	25-04-1994
		JP 4004393 B	28-01-1992
		JP 6010104 A	18-01-1994
		JP 6041700 A	15-02-1994
		JP 6010105 A	18-01-1994
		JP 7011396 A	13-01-1995
EP 0563606 A	06-10-1993	DE 4210748 C	16-12-1993
		AT 168496 T	15-08-1998
		DE 59308759 D	20-08-1998
		ES 2118844 T	01-10-1998

